Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 2. С. 125–136. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 2, pp. 125–136. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 539.219.1 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-125-136



Исследование распространения трещины в поверхностном белом слое рельсовой стали

А. Ю. Перелыгина, В. Ю. Конюхов, А. Е. Балановский
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена оценке растрескивания белых слоев, формирующихся на поверхности рельса в процессе эксплуатации. Трещины в белом слое рельсовой стали обнаруживаются уже после 1 тыс. циклов испытаний. Это объясняется растягивающими и сдвиговыми напряжениями на поверхности пятна контакта колеса и рельса. В работе представлены результаты исследований морфологических характеристик белого слоя на поверхности рельса.
Материалы и методы. Объект исследования (поверхность рельса после эксплуатации) рассматривался под микроскопом. Затем была разработана двумерная модель конечных элементов плоской деформации, чтобы моделировать динамические характеристики растрескивания белого слоя. Предложены математические модели, описывающие распространение трещины. Для этого применили критерий механики упругого пластического разрушения, метод *J*-интеграла. В программе *SYSWELD* выполнено численное моделирование образования белого слоя и распределения остаточных напряжений.
Результаты исследования. Представлены оптические снимки микроструктуры поперечного сечения белого слоя на поверхности рельса после эксплуатации. На задней кромке белого слоя исследованных образцов зафиксированы два разных типа трещин. В программе *SYSWELD* визуализированы фрагменты моделирования механизма образования белого слоя с распределением остаточных напряжения, сжатия и растяжения. Результаты расчетов показывают, что значения *J*-интеграла для всех трех трещин немного уменьшаются, если длина трещины достигает 10–50 мкм.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты применимы для оценки износостойкости рельсовых сталей и прогнозирования направления роста трещины. Сравнения *J*-интегральных максимумов показали, что при одинаковых условиях нагрузки трещина № 1, скорее всего, будет расти быстрее, чем трещины № 2 и 3. С увеличением длины трещины максимумы *J*-интеграла всех трех трещин уменьшались.

Ключевые слова: рельсовая сталь, белый слой, трещина, упругое пластическое разрушение, метод *J*-интеграла распределением остаточных напряжений.
Для цитирования: Перелыгина, А. Ю. Исследование распространения трещины в поверхностном белом слое рельсовой стали / А. Ю. Перелыгина, В. Ю. Конюхов, А. Е. Балановский // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 2. — С. 125–136. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-125-136



Investigation of crack propagation in the surface white layer of rail steel

A. Yu. Perelygina, V. Yu. Konyukhov, A. E. Balanovskii
Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

Introduction. The paper is devoted to the evaluation of cracking of white layers formed on the surface of the rail while in operation. Cracks are detected in the white layer of rail steel after one thousand test cycles. This is due to tensile and shear stresses on the surface of the wheel–rail contact spot. The paper presents the study results of the morphological characteristics of the white layer on the rail surface.
Materials and Methods. The object of study (rail surface after operation) was examined under a microscope. Then, a two-dimensional model of finite elements of the plane deformation was developed to simulate the dynamic characteristics of the white layer cracking. Mathematical models describing crack propagation are proposed. For this,

we applied the criterion of the elastic plastic fracture mechanics, the *J*-integral method. The *SYSWELD* program performed numerical modeling of the formation of a white layer and the distribution of residual stresses.
Results. Optical images of the microstructure of the cross section of a white layer on the rail surface after operation are presented. Two different types of cracks were fixed at the trailing edge of the white layer of the samples studied. The *SYSWELD* program visualized fragments of simulating the mechanism of the white layer formation with the distribution of residual stresses, compression, and tension. The calculation results show that the values of the *J*-integral for all three cracks slightly decrease if the crack length reaches 10–50 µm.
Discussion and Conclusions. The results obtained are applicable to assess the wear resistance of rail steels and predict the direction of crack growth. Comparisons of *J*-integral maxima have shown that under identical load conditions, crack no. 1 is likely to grow faster than cracks nos. 2 and 3. With an increase in the length of the crack, the maxima of the *J*-integral of all three cracks decreased.

Keywords: rail steel, white layer, crack, elastic plastic fracture, *J*-integral method, distribution of residual stresses.

For citation: A. Yu. Perelygina, V. Yu. Konyukhov, A. E. Balanovskii. Investigation of crack propagation in the surface white layer of rail steel. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 125–136. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-125-136

Введение. Известно, что детали машин и механизмов, различные функциональные конструкции часто испытывают катастрофическое хрупкое разрушение. При этом в зависимости от условий эксплуатации металл может разрушаться пластично или хрупко [1–3]. Хрупкое разрушение возникает из-за роста трещин, которые внезапно становятся неустойчивыми и распространяются в материале со скоростью звука. Трещины в металле могут иметь технологическое происхождение или зарождаться и расти в процессе эксплуатации. Белый нетравящийся слой (англ. *whitenonetchinglayer*, *WEL* — это явление, которое возникает на поверхности эксплуатируемого рельса под действием колес. *WEL* образуется из-за сильной многоцикловой пластической деформации. Установлено [4–6], что от усталости при контактном качении на поверхности рельса трещины связываются с белым слоем. Слой назван так из-за его устойчивости к травлению кислотами во время металлографической подготовки и белого «безликого» внешнего вида (так он выглядит под микроскопом). Белый слой обычно встречается в пятнах контакта на поверхности рельса. Его глубина — ~0,10–100 мкм после нескольких месяцев эксплуатации рельса [4]. Важная особенность белого слоя — твердость. Она достигает 1300 *HV* [5], но обычно находится в диапазоне 700–1200 *HV* [6]. Такое состояние может привести к образованию хрупких трещин в белом слое и последующему распространению усталостных трещин. Авторы [4], исследовав рельсы после эксплуатации, обнаружили, что трещины присутствовали в белом слое, но не проникали за границу раздела с основным металлом рельса [4, 5]. Трещины развивались на поверхности и распространялись вдоль границы раздела между *WEL* и перлитной структурой материала, вызывая сильный износ. Механизм образования белого слоя и его микроструктура изучались многими авторами [6–12]. Микроструктура слоя идентифицируется как перечисленные ниже смеси:

— мартенсит с остаточным аустенитом и чистый мартенсит, насыщенный азотом и углеродом;

— феррит с мартенситом;

— остаточный аустенит и мартенсит с отпущенным мартенситом;

— феррит с цементитом, карбид и нанокристаллическая фаза α-*Fe*.

Обнаружено [6, 7, 9], что белый слой имеет мартенситную микроструктуру с высокой плотностью дислокаций. Авторы [8–10] предположили, что *WEL* состоит из нанокристаллической фазы α-*Fe* с размером зерен от 15 до 500 нм. Согласно [7], *WEL* состоит из сильно деформированного перлита, нанокристаллического мартенсита, аустенита и цементита. В [8] представлены результаты рентгеновских измерений остаточных сжимающих напряжений в *WEL* и выявлены значительные напряжения сжатия рельса (~600 МПа) в обоих направлениях: продольном и поперечном. Анализ работ [4–19] показывает, что трещины в белом слое рельсовой стали обнаруживаются после всех испытаний, даже тех, которые выполнены всего за 1 тыс. циклов. Причина тому — смешанные растягивающие и сдвиговые напряжения на поверхности пятна контакта колеса и рельса. После появления трещины в белом слое она быстро растет из-за хрупкости структуры мартенсита, пока

не достигнет границы раздела с основным металлом рельса, имеющим структуру перлита — здесь иная микроструктура отклоняет трещину и замедляет ее распространение. Это отклонение вызвано ориентацией цементитных пластин в перлитной структуре [10–19], которые параллельны поверхности качения. Согласно [12], снижение усталостного сопротивления рельса связано с давлением контакта и коэффициентом проскальзывания. Авторы [13] установили, что зарождение трещины в белом слое вызвано силой тяги и спроектированной поперечной нагрузкой сдвига к поверхности рельсовой колеи. Идентифицированы два типа трещин:

— ведущая трещина дефекта в пятне контакта (вызвана сдвигом);

— задняя трещина (хрупкое разрушение в форме клина).

Авторы [14] связали коротковолновое динамическое взаимодействие между колесом и рельсом с началом и ростом деформирования поверхности. В условиях контактного качения в рельсовой стали при усталости выявили три вида трещин [15]:

1) перпендикулярные поверхности контакта,

2) с углом наклона,

3) параллельные поверхности контакта на различных глубинах.

Для определения напряженного состояния вблизи вершины трещины в условиях контакта с качением авторы предложили численный метод и зафиксировали изменение формы трещины. В [16] применили критерии направления роста трещины в смешанном режиме для оценки поведения при растрескивании. Показано, что трещины росли в направлении плоскости максимального напряжения сдвига, а не перпендикулярно плоскости. Авторы [17] разработали двумерную модель конечных элементов для моделирования поведения трещин в контакте качения (колеса и рельса) с учетом четырех коротких трещин. Обнаружено, что напряжение сдвигового режима играет доминирующую роль в росте трещины, более длинная трещина растет вверх, и это приводит к отколу поверхностного слоя. С помощью двумерной вычислительной модели авторы [18] обнаружили, что скорость роста трещин на поверхности рельса увеличивается с увеличением длины трещины и начинает уменьшаться после определенной глубины. В исследовании динамического взаимодействия колеса с рельсом [19] использована трехмерная модель конечных элементов и зафиксировано различное поведение при растрескивании из-за статических и динамических решений. В [20] учтены эффекты остаточного напряжения при изучении пути и скорости роста трещины. Во многих работах, в том числе [21, 22], показано влияние жидкости на дальнейшее развитие трещин. Предполагается, что жидкость на поверхностях трещин существенно влияет на их раскрытие (коэффициент интенсивности напряжений режима I). Если же трещина развивается в сухих условиях, то доминирует режим сдвига [22]. До настоящего времени линейная механика упругого разрушения широко применялась при численном моделировании контакта колес с рельсами [23, 24]. Такой подход оценивает сопротивление нестабильному распространению трещины, или трещиностойкость металлов, при статическом нагружении по одному или нескольким критериям разрушения:

— силовому (критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c});

— деформационному (критическое раскрытие в вершине трещины);

— энергетическому (критическое значение *J*-интеграла, работы пластической деформации и разрушения).

На практике материалы вблизи области контакта могут быть пластически деформированы из-за высокой нагрузки на оси [3–6]. Чтобы получить более точное решение, следует использовать расчеты с упругопластической механикой разрушения или критериями, основанными на энергии. Кроме того, трещины могут формироваться в областях, прилегающих к белому слою [7–12], и механизмы их развития до сих пор полностью не изучены. Опубликованы работы по образованию белого слоя и трещин [14, 15], однако детально не исследовалось поведение распространения трещин в площади белого слоя. Более того, применительно к рассматриваемой ситуации не описано влияние условий нагружения, трения и других параметров

взаимодействия. В данной работе представлены результаты исследования морфологических характеристик белого слоя на поверхности рельса.

Материалы и методы. Сначала объект изучения рассматривался под микроскопом. Затем была разработана двумерная модель конечных элементов плоской деформации, чтобы моделировать динамические характеристики растрескивания белого слоя. Согласно выдвинутой гипотезе, область контакта на поверхности рельса пластически деформировалась при взаимодействии колеса и рельса, поэтому для оценки поведения распространения трещины введен *J*-интегральный критерий, основанный на энергии.

Образцы, содержащие белые слои на поверхности головки рельса, вырезаны из рельса, в свое время эксплуатировавшегося на Восточно-Сибирской железной дороге. Рельс изготовлен из перлитной стали по ГОСТ51685-2013. Это сталь марки 76ХФ: *C* 0,78 %, *Si* 0,54 % и *Mn* 0,8 %, *Cr* 0,40 %, *V* 0,035 %. Определены механические свойства рельса:

— предел текучести — 944 кН,

— временное сопротивление — 1287 кН,

— относительное удлинение — 11,5 %,

— относительное сужение — 31 %,

— ударная вязкость 18 Дж/см^2.

Температура испытаний +20 °С. Макротвердость по Бринеллю на поверхности катания в местах без белых слоев составила 435, 485, 445, 465 и 494. Это не соответствует требованиям ГОСТ 51685−2013 (должна быть 352–405 по Бринеллю). Упрочнение поверхности головки рельсов в процессе эксплуатации обусловлено совокупным действием ряда физических механизмов [4–16]. Для расчета принят модуль Юнга *E* = 206 ГПа, модуль сдвига — 80 ГПа, плотность — 7850 кг/м^3 [3–10]. Стандартная металлографическая процедура выполнялась после секционирования образцов в направлении, параллельном направлению движения. После резки образец залили в смолу, прошлифовали с помощью шкурки карбида кремния (зернистость 1200–3000) и отполировали микросиликой 0,5 мкм. Поперечное сечение наблюдали в оптический микроскоп после травления 2-процентным спиртовым раствором азотной кислоты в течение 7 секунд. Механизм образования белого слоя исследовали при помощи программы *SYSWELD*, которая использует аналитическую модель объемного тепловыделения двойного эллипсоида Голдака. Предписаны три типа теплового источника: 2D Гауссов, двойной эллипсоид и 3D конический Гауссов. После того как определены геометрические параметры модели нагрева и задана величина максимального объемного тепловыделения, выполняется приближенный расчет при постоянных теплофизических характеристиках. Все необходимые для моделирования свойства материала задаются в виде кусочно-линейных функций. В программе *SYSWELD* одновременно с тепловой задачей решается металлургическая. В последнем случае расчеты основаны на модели Леблонда, которая описывает металлургическое превращение одной фазы в другую. Решение задач механики сводится к определению термических деформаций. Для этого в программе нужно задать: модуль упругости первого рода, коэффициент Пуассона, коэффициент теплового расширения, а также кривые упрочнения для металлургических фаз. При растрескивании в белом слое в условиях подвижного контакта наблюдения выполняли с использованием программного обеспечения (ПО) *ANSYS* / *LS-DYNA*, которое предназначено для моделирования методом конечных элементов. При исследованиях динамики железнодорожных экипажей широко применяется известный алгоритм названного ПО — *FASTSIM* с эллиптической областью контакта [25]. По сравнению с геометрическими размерами колеса и рельса область контакта довольно мала (площадь не более 15 мм^2 [25]). Следовательно, модель контакта колеса с рельсом можно упростить до условия деформации 2D плоскости [26, 27]. На продольном сечении были построены белые слои в форме дуги длиной 2 мм и толщиной 0,2 мм (параметры получены в результате анализа исследований *WEL* на поверхности рельса [4–15]). С целью снижения вычислительных затрат и обеспечения точности в модели применили метод адаптивного построения сетки. В районе белого слоя использовались очень мелкие сетки рис. 1.

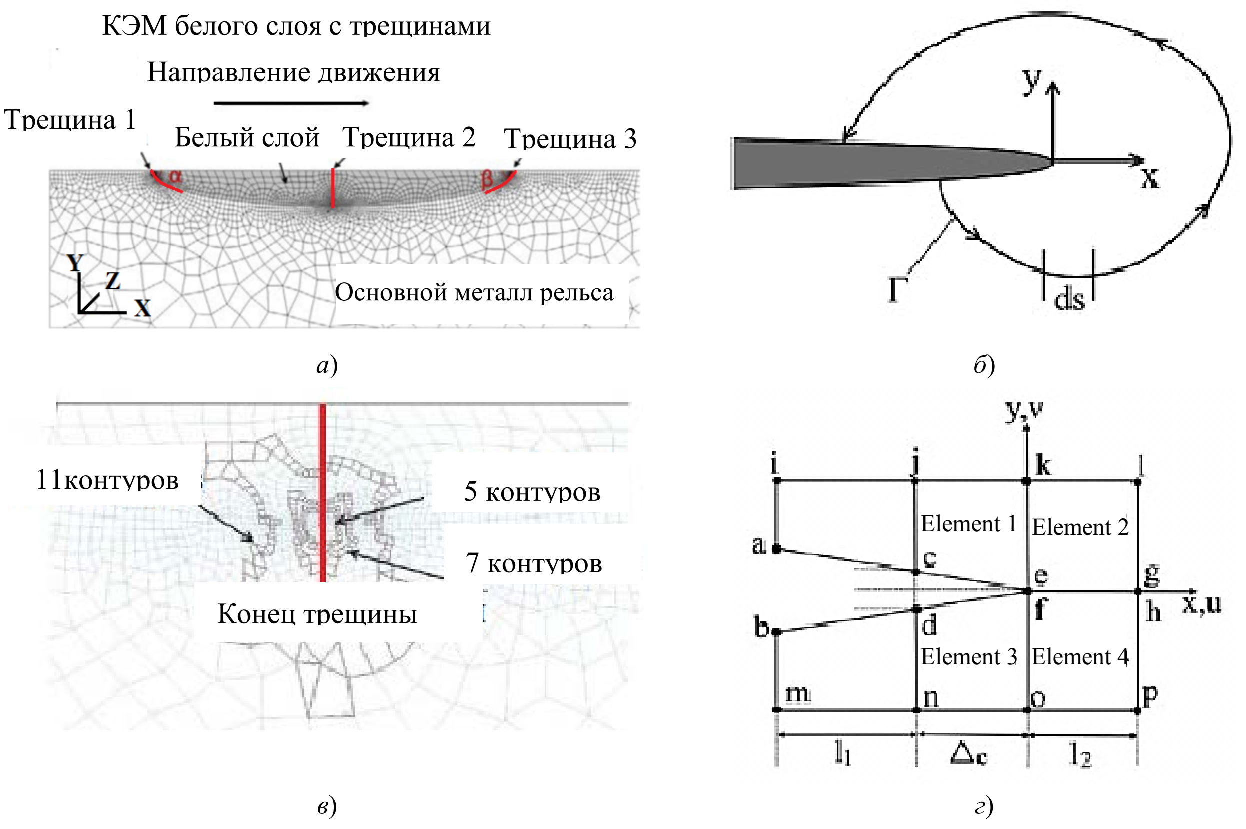


Рис. 1. Конечноэлементное моделирование (КЭМ) белого слоя с тремя трещинами (*а*); и преобразование интеграла контура элемента в интеграл контура поверхности: произвольный контур вокруг вершины трещины (*б*); различные контуры элементов, выбранные для представления независимости от пути вычисления *J*-интеграла (*в*); принципиальная схема 2D метода виртуального закрытия трещины для расчета коэффициента интенсивности напряжений (*г*).

Установленный минимальный размер элемента — 0,02×0,02 мм^2. Элементы на концах и гранях трещин имели более высокую плотность сетки с установленным минимальным размером элемента 0,01×0,01 мм^2. Это позволяет точно захватывать градиенты напряжений. За пределами зоны растрескивания применены более крупные сетки с минимальным размером элемента 0,1×0,1 мм^2 в контактных поверхностях колеса и рельса. Они постепенно увеличиваются по направлению к дальним участкам поля. Сначала рельс объединили в 776 919 элементов с 789 084 узлами, которые изменились во время моделирования из-за применения метода адаптивной сетки. Такой размер модели является приемлемым для получения точных расчетов контакта с качением [19, 20, 28]. Постоянное вертикальное усилие нагружения в 13000 Н было приложено к колесу, что соответствовало эквивалентному максимальному давлению по Герцу ~1,2 ГПа [25]. Колесу задали скорость вращения ω 43,5 рад/с, что равняется скорости перемещения 72 км/ч с коэффициентом трения 0,3. Исследовано, как на свойства трещин в белом слое влияют их длина, изменения угла наклона, давление нагрузки и коэффициент трения.

Рост трещин, разрушающих поверхность, проанализирован в предположении линейной механики упругого разрушения [1–3, 17–19]. Для более точного решения использован критерий механики упругого пластического разрушения, метод *J*-интеграла, который применим как для линейных, так и для упругих пластических решений [29]. Он был введен для изучения поведения распространения трещины. Для численных расчетов *J*-интеграл можно получить из решения в дальней зоне [29]. В рамках работы с конечными элементами интеграл контура элемента должен быть преобразован в интеграл контура поверхности, как показано на рис. 1*б*, где Г — это контур кривой, который определяет границу *J*-интеграла, и он направлен против часовой стрелки от нижней грани трещины к верхней. *J*-интеграл может быть дополнительно оценен как:

$$J = \int (w\,dy - T_i \frac{du_i}{dx} ds),$$

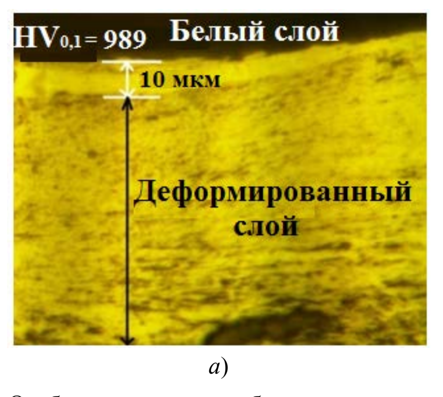
где w — плотность энергии деформации; T_i — вектор тяги; u_i — компонент вектора смещения; ds — приращение длины по контуру Г [29].

Оценка *J*-интеграла реализована в *LS-PrePost* как инструмент постобработки. Это приложение также подходит для 2D моделирования плоской деформации [30]. Для расчета *J*-интеграла вокруг вершины трещины

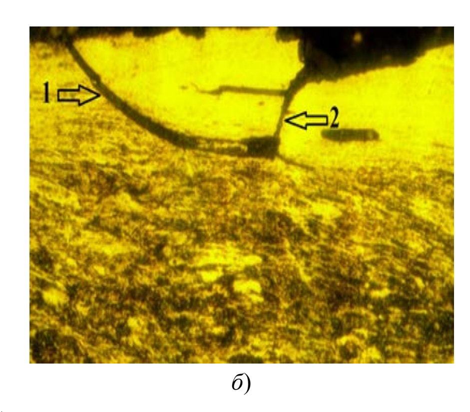
были выбраны различные контуры элементов (рис. 1*в*). Важно отметить, что условия разгрузки для независимого от пути *J*-интеграла не предлагаются в соответствии с механикой разрушения [31]. Принцип расширения *J*-интегральной методологии за пределы допустимости линейной механики упругого разрушения заключался в идеализации упругопластической деформации как нелинейной упругой деформации. Известна идентичность характеристик нагрузки — деформации для упругопластических и нелинейно-упругих материалов [30, 31]. Упругопластический материал следует линейному пути разгрузки с наклоном, равным модулю Юнга. Нелинейный упругий материал разгружается по тому же пути, что и при загрузке. Таким образом, анализ предполагает, что нелинейно-упругое поведение справедливо для упругопластического материала. Разгрузка происходит вблизи вершины трещины после того, как колесо прошло по рельсу. Рассчитанные значения *J*-интеграла могут быть действительными только до достижения максимума. Поэтому в представленной работе обсуждаются только максимальные показатели *J*-интеграла. Коэффициенты интенсивности напряжений в рамках конечноэлементной схемы вычислялись 2D методом виртуального закрытия трещины [29–32]. Силы y и x, необходимые для соединения узлов c и d (рис. 1*г*), обозначаются F_c и T_c соответственно.

Следует отметить, что теория механики линейного упругого разрушения основана на предположении об отсутствии пластической деформации вокруг трещин. В то же время, согласно работам [1–3], использование теории механики линейного упругого разрушения корректно, т. к. нелинейная деформация материала ограничена небольшой областью, окружающей кончик трещины. Некорректны рассуждения о том, что в связи с малой областью контакта можно рассматривать плоскую задачу. При плоской деформации эта область полосовая и бесконечная. А в рассматриваемом случае речь идет о существенно трехмерной задаче. В [32] описывается сложность геометрии рельса и ограниченность области, в которой происходят основные изменения напряженно-деформированного состояния. Авторы названной работы предлагают рассматривать упрощенную осесимметричную задачу для многослойного покрытия в форме кусочно-неоднородного слоя. В [33] исследуется напряженно деформированное состояние многослойного покрытия в окрестности области контакта колеса и рельса. При этом показано, что жесткость и толщина верхнего слоя покрытия существенно влияют на эквивалентные и контактные напряжения. При фиксированных механических параметрах покрытия с увеличением толщины его верхнего слоя уменьшаются значения максимальных эквивалентных и контактных напряжений. Авторы [34] наносили тонкие многослойные покрытия на поверхность железнодорожного рельса в окрестности бокового контакта рельса и колеса. Напряженно-деформированное состояние этих покрытий исследовалось при различных значениях их геометрических и механических параметров в процессе поворотных движений.

Результаты исследования. На рис. 2 представлены оптические снимки микроструктуры поперечного сечения белого слоя на поверхности рельса.



а)



б)

Рис. 2. Особенности трещин в белом слое на поверхности рельса, обнаруженные с помощью оптической микроскопии: общий вид белого и деформированного слоя при 200-кратном увеличении (*а*); 1 — трещина переднего края, 2 — трещина среднего положения при 500-кратном увеличении (*б*)

На рис. 2*а* показан сегмент белого слоя на поверхности. Его глубина 10 мкм. Значение микротвердости в белом слое $HV_{0,1} = 989$. Это соответствует особенностям *WEL*, представленным в работах [4–15]. Толщина *WEL* может достигать 200–300 мкм в зависимости от условий эксплуатации [4–6]. На изображении видна резкая граница между белым слоем и деформированной перлитной структурой основного металла рельса. Глубина зоны пластической деформации между *WEL* и основным материалом рельса составляет ~70 мкм. По оценкам [5–10], на эксплуатируемых перлитных рельсах в пятне контакта «колесо — рельс» пластическая

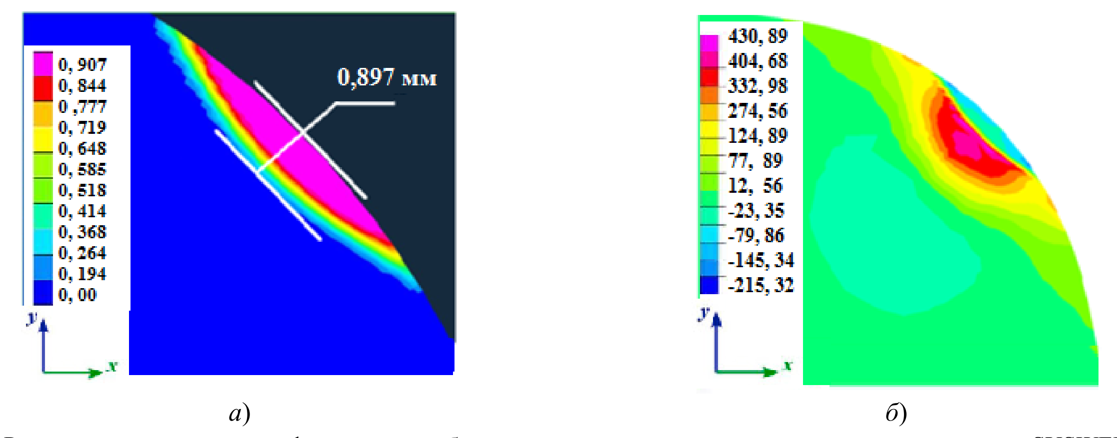
деформация имеет высокую концентрацию, создавая зону тонкого сдвига 502 180 мкм. В то же время испытания на твердость показывают, что из-за объемного контакта глубина пластической деформации может доходить до 1–10 мм [4–9, 27–30]. Это приводит к важной эволюции микроструктуры в более узком масштабе, а именно: к изгибу или разрыву цементитных пластин, уменьшению межпластиночного расстояния. Меняются и механические свойства, т. к. увеличивается прочность на растяжение и уменьшается вязкость разрушения для трещин, параллельных выровненным пластинкам цементита. На переднем крае *WEL* расположены две различные трещины (рис. 2*б*). Они могут возникать и распространяться на границе раздела между *WEL* и деформированной перлитной микроструктурой. Детальное исследование других образцов показало, что наклонная трещина появилась на передней кромке *WEL*, следуя направлению течения материала рельса. Затем трещина идет вниз, в материал рельса вдоль границы слоя. На рис. 2*б* показана трещина, распространяющаяся вертикально в среднем положении в пределах *WEL*. На исследованных образцах на задней кромке *WEL* наблюдаются два разных типа трещин. Они получены из разных участков *WEL*, но расположены на одном и том же рельсовом образце и очень близко друг к другу. Трещина первого типа формируется и распространяется вдоль границы между белым слоем и зоной пластической деформации (рис. 2*б*). Трещина второго типа пересекает границу раздела с деформированной микроструктурой, но демонстрирует тенденцию искривления вдоль линии по направлению деформации сдвига перлита.

Такое поведение трещин описано в работах [4–7]. Действительно, исследованные нами трещины расположены в одном и том же белом слое, следовательно, они подвергались одинаковым нагрузкам. Однако скорости их роста и развития различны. Это указывает на изменение состояния напряжения в ведущем, среднем и заднем положении в белом слое. Значит, должен быть другим механизм последующего распространения трещины (т. е. позади ее). Как показано в работах [35, 36], пластически деформированная структура перлитной области непосредственно под белым слоем может играть существенную роль в воздействии на распространение трещин. Трещины, которые образуются из-за усталости при контакте качения, можно разделить на две категории по месту их образования: под поверхностью и на поверхности.

Обычно под поверхностью трещины возникают из-за сильной вертикальной нагрузки в сочетании с дефектами материала. На поверхности большинство трещин образуются из-за взаимодействия колеса и рельса, а также переноса большой нагрузки в небольшую область контакта. Площадь контакта эллиптическая. Она относительно мала и при этом поддерживает всю нагрузку колеса. Трещины, которые образуются в результате усталости при контакте качения и являются результатом интенсивного напряжения сдвига в области контакта колеса и рельса, будут расти, когда эти напряжения превышают величину допустимого растяжения рельсовой стали. Также возможно, что трещины продвинутся к вершине рельсов. Согласно [11, 12, 23], скорость нагрева поверхностного слоя рельса, возникающая при прохождении поезда, может превышать 10^6°C/с и достигать температуры, при которой образуется аустенит. После прохождения поезда при быстром охлаждении аустенит превращается в мартенсит. Время контакта колеса с рельсом чрезвычайно коротко (миллисекунды). При этом сталь из эвтектоидного состава нагревается от комнатной температуры до 727°C со скоростью 10^6°C/с. Таким образом, практически невозможно измерить фактические изменения температуры в течение рассматриваемого периода. С другой стороны, быстрый нагрев и закалку можно моделировать и контролировать в программе *SYSWELD*. Для этого использовали скорости нагрева 20–1000 °C/с, которые получали за счет параметра скорости перемещения теплового источника по поверхности рельса в диапазоне скоростей 5–100 мм/с.



На рис. 3 показан фрагмент моделирования механизма образования белого слоя в программе *SYSWELD*.



а) *б*)

Рис. 3. Результаты моделирования формирования белого слоя на поверхности головки рельса в программе SYSWELD: доля мартенсита в белом слое, % (*а*); распределение остаточных напряжений в белом слое, МПа (*б*)

По данным табл. 1 можно судить о том, как уровень остаточных напряжений зависит от параметров дорожки и скорости упрочнения.

Таблица 1

Величина остаточных напряжений (сжатия и растяжения) по ширине и глубине дорожки при скорости упрочнения 15 мм

Расстояние по центру оси дорожки (глубина), мм	0	0,65	0,77	0,86	0,96	1,22	1,54	2,5	3,0
Остаточные напряжения, МПа	–43	–87	–15	323	445	347	396	274	176
Расстояние по центру от оси дорожки (ширина), мм	0	0,14	1,65	1,92	2,19	2,59	3,16	3,91	5,2
Остаточные напряжения, МПа	–43	–92	–140	–189	–116	30	200	249	128

Белый слой, смоделированный в программе, состоит из мартенсита. Морфология слоя аналогична наблюдаемой в исследуемом рельсе (рис. 2). Твердость моделируемого *WEL* — 670–810 *HV*. Это немного ниже, чем в рельсах (*WEL* ~ 725–1050 *HV*). Однако текущие моделирования представляют только один цикл фазового превращения. Моделировались от одного до пяти повторных циклов термообработки на поверхности головки рельса. Установлено, что твердость увеличивается до 700–850 *HV*. Очевидно, мартенсит с такой же твердостью, что и в белом слое рельса, может быть получен после нескольких проходов колес. При моделировании формирования белого слоя выяснилось, что в этом процессе важную роль играют изменение температуры во время контакта колеса с рельсом и распределение остаточных напряжений.

На рис. 4. показаны *J*-интегральные максимумы на кончиках смоделированной трещины.

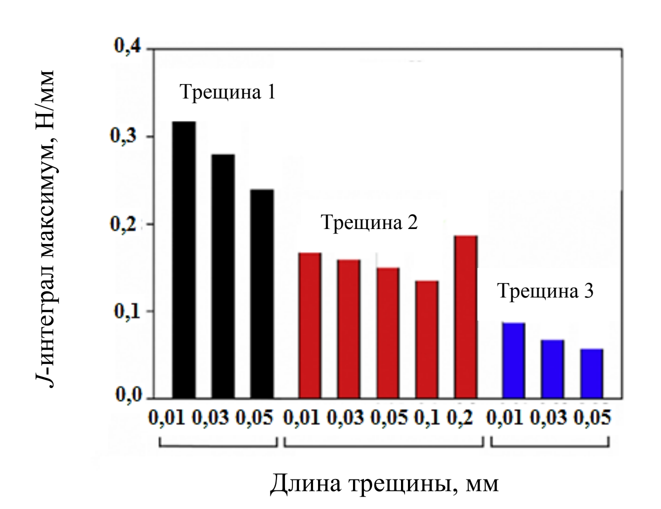


Рис. 4. Максимальные значения *J*-интеграла на кончиках трещин в передней, средней и задней кромках *WEL* (длина трещины для расчета выбирается как 0,01 мм; 0,03 мм; 0,05 мм; 0,1 мм и 0,2 мм отдельно)

Следует отметить, что длина трещины измеряется от поверхности рельса на глубину *WEL*. На представленном варианте моделирования трещины № 1, 3 возникают под углом α и β (83,13°), максимальное нагрузочное давление — 1,2 ГПа. При этом все три трещины имеют длину 10 мкм. На вершине трещины № 1 значение *J*-интеграла достигает максимума 0,321 Н / мм. Максимальные значения *J*-интеграла для трещин № 2 и № 3 намного меньше — 0,18 Н / мм и 0,088 Н / мм соответственно. Анализ рис. 4 показывает, что трещина № 1 на переднем крае *WEL*, скорее всего, будет расти по сравнению с трещинами в среднем положении и на задней кромке. Этот факт согласуется с экспериментами на усталость при качении [10–18]. Показано, что граница (начало) белого слоя на поверхности рельса и основного металла имеет самую низкую сопротивляемость образованию дефекта контактно-усталостного характера, в то время как усталостная долговечность в конце *WEL* примерно в 3 раза выше, чем в центре и начальной точке. Из рис. 4 видно, что максимумы *J*-интеграла вокруг вершин трещин показывают тенденцию к уменьшению с увеличением длины или глубины. Это явление более значительно для трещины № 1, чем для № 2 и № 3. По мере увеличения длины трещины максимальное значение *J*-интеграла для всех трех трещин уменьшается соответственно с 0,3214 *Н* / мм до 0,222 *Н* / мм; с 0,18 *Н* / мм до 0,14 *Н* / мм и с 0,088 *Н* / мм до 0,062 *Н* / мм. Это согласуется с результатами [19], поскольку на более глубокие поверхности трещины меньше влияют нормальные и тангенциальные контактные нагрузки. Однако из рис. 4 видно, что для трещины № 2, когда ее длина составляет

200 мкм и соответствует толщине *WEL*, максимум *J*-интеграла демонстрирует противоположную тенденцию, о которой никогда не сообщалось. Максимум *J*-интеграла в этом случае наибольший по сравнению с другими короткими трещинами № 2. Можно предположить, что трещина № 2 будет быстро распространяться к границе *WEL* и подложки. Это хорошо видно на рис. 2*б* (стрелка 2). Существенная разница объясняется материальными неоднородностями между идеально упругой *WEL* и упругопластичной рельсовой матрицей. Результаты расчетов показывают, что для всех трех трещин значения *J*-интеграла немного уменьшаются, когда длина трещины увеличивается от 10 до 50 мкм. Если углубление трещины № 2 составляет от 50 до 100 мкм, изменение *J*-интеграла относительно невелико. Напротив, отмечается существенный рост максимального значения *J*-интеграла, если трещина № 2 распространяется через весь слой на границу между *WEL* и матрицей рельса.

Максимальное значение *J*-интеграла резко возрастает с усилением нагрузочного давления от 0,8 до 1,5 ГПа:

— с 0,27 Н / мм до 0,53 Н / мм для трещины № 1,

— с 0,17 Н / мм до 0,47 Н / мм для трещины № 2,

— с 0,04 Н / мм до 0,1 Н / мм для трещины № 3.

Это говорит о том, что трещины с большей вероятностью распространяются при высоких нагрузках. Максимальное основное напряжение вокруг вершины трещины можно использовать как индикатор для оценки свойств разрушения и пути трещины [19–26]. Например, если длина трещины № 1 составляет 10 мкм, максимальное основное напряжение на вершине трещины — 1589 МПа. Для трещин № 2, 3 с одинаковой длиной получаются разные концентрации напряжений вокруг вершин трещины, и максимальное основное напряжение составляет около 1506 МПа и 1261 МПа соответственно. Увеличение длины с 10 до 100 мкм приводит к снижению максимального основного напряжения с 1506 МПа до 1206 МПа. Когда трещина распространяется вниз к границе белого слоя, можно наблюдать резкий рост концентрации напряжений. Это хорошо видно из моделирования распределения остаточных напряжений по глубине слоя (рис. 3). Итак, согласно *J*-интегральным расчетам, при одинаковых условиях нагрузки трещины в передней кромке белого слоя распространяются с большей вероятностью, чем в средней позиции и задней кромке. Это согласуется с ростом трещин. При этом из-за неоднородности материала возникает сложное поле напряжений, когда средняя трещина распространяется на границе раздела белого слоя и основного металла. Это приводит к высокой концентрации напряжений и тем самым ускоряет распространение трещины. Следует отметить, что в данной работе не учитывались анизотропные характеристики материала, вызванные сильной пластической деформацией в переходной зоне. В [4–10] показано, что такого рода деформация сдвига приводит к удлинению и выравниванию цементитных колоний поверхностного слоя головки рельса (рис. 2*а*). Выявлено, что полосы сдвига и области с высокой плотностью дефектов встречаются в переходной зоне белого слоя и некоторые цементитовые пластинки в этой области разрушены [4–8]. Хотя механика линейного упругого разрушения не отражает детальную физику ситуации [1–3], она способствует пониманию направлений наблюдаемого роста трещины. Для получения более развернутой информации по динамике трещинообразования в белом слое на поверхности рельса необходимо учитывать коэффициенты интенсивности напряжений. В то же время трещины контакта качения испытывают смешанную нагрузку, соответствующую последовательности растягивающих напряжений с последующим циклом сдвига [4–20]. Следовательно, коэффициенты интенсивности напряжений в направлении максимального тангенциального напряжения также могут применяться для прогнозирования направления роста трещины.

Обсуждение и заключение. Установлено, что трещины в переднем крае белого слоя (трещина № 1) распространяются от края слоя вдоль границы раздела между белым слоем и основным металлом рельса. Трещины № 2 (в середине слоя) растут вертикально, прежде чем достигнуть пластически деформированной матрицы. Трещины № 3 задней кромки демонстрируют две тенденции в развитии. В первом случае трещина идет по границе раздела, во втором пересекает материал рельса и постепенно выравнивается по направлению деформации. Сравнения *J*-интегральных максимумов показали, что при одинаковых условиях нагрузки трещина № 1 с наибольшей вероятностью будет иметь высокую скорость роста по сравнению с трещинами № 2, 3. С увеличением длины трещины максимумы *J*-интеграла всех трех трещин уменьшались. Установлено большое влияние давления нагрузки на развитие всех рассмотренных типов трещин.

Библиографический список

1. Когаев, В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. — Москва : Машиностроение, 1985. — 224 с.

2. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. — Москва : Наука, 1974. — 288 с.

3. Витвицкий, П. М. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел / П. М. Витвицкий, С. Ю. Попина. — Киев : Наукова думка, 1980. — 186 с.

4. Clayton, P. Metallurgical aspects of surface damage problems in rails / P. Clayton, M. B. P. Allery // The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science. — 1982. — Vol. 21, iss. 1. — P. 31–46.

5. Baumann, G. Formation of White-Etching Layers on Rail Treads / G. Baumann, H. Fecht, S. Liebelt // Wear. — 1996. — Vol. 191. — P. 133–140. doi.org/10.1016/0043-1648(95)06733-7.

6. Newcom, S. B. A transmission electron microscopy study of the white etching layer on a railhead / S. B. Newcom, W. M. Stobbs // Materials Science and Engineering. A. — 1984. — Vol. 66, iss. 2. — P. 195–204. doi.org/10.1016/0025-5416(84)90180-0.

7. Jirásková, Y. Microscopic investigation of surface layers on rails / Y. Jirásková, J. Svoboda, O. Schneeweiss [et al.] // Applied Surface Science. — 2005. — Vol. 239, iss. 2. — P. 132–141. doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.05.289.

8. Österle, W. Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electron microscopy, X-ray and synchrotron X-ray diffraction / W. Österle, H. Rooch, A. Pyzalla, L. Wang // Materials Science and Engineering. A. — 2001. — Vol. 303, iss. 1/2. — P. 150–157.

9. Lojkowski, W. Nanostructure formation on the surface of railway tracks / W. Lojkowski, M. Djahanbakhsh, G. Bürkle [et al.] // Materials Science and Engineering. A. — 2001. — Vol. 303, iss. 1/2. — P. 197–208. doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01947-X.

10. Zhang, H. W. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail / H. W. Zhang, S. Ohsaki, S. Mitao [et al.] // Materials Science and Engineering. A. — 2006. — Vol. 421, iss. 1/2. — P. 191–199. doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.033.

11. Chou, Y. K. White layers and thermal modeling of hard turned surfaces / Y. K. Chou, C. J. Evans // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 1999. — Vol. 39, iss. 12. — P. 1863–1881. doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00036-X.

12. Clayton, P. The relations between wear behavior and basic material properties for pearlitic steels / P. Clayton // Wear. — 1980. — Vol. 60, iss. 1. — P. 75–93.

13. Steenbergen, M. On the mechanism of squat formation on train rails. Part II: growth / M. Steenbergen, R. Dollevoet // International Journal of Fatigue. — 2013. —Vol. 47. — P. 373–381.

14. Li, Z. Squat growth — some observations and the validation of numerical predictions / Z. Li, R. Dollevoet, M. Molodova, X. Zhao // Wear. — 2013. — Vol. 271, iss. 1. — P. 148–157. doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.051.

15. Olzak, M. Investigation of crack propagation during contact by a finite element method / M. Olzak, J. Stupnicki, R. Wojcik // Wear. — 1991. — Vol. 146, iss. 3. — P. 119–128.

16. Bold, P. E. Shear mode crack growth and rolling contact fatigue / P. E. Bold, M. W. Brown, R. J. Allen // Wear. — 1991. — Vol. 144, iss. 1/2. — P. 307–317.

17. Ringsberg, J. W. Shear mode growth of short surface-breaking RCF cracks / J. W. Ringsberg // Wear. — 2005. — Vol. 258, iss. 7. — P. 955–963.

18. Seo, J. Fatigue crack growth behavior of surface crack in rails / J. Seo, S. Kwon, H. Jun, D. Lee // Procedia Engineering. — 2010. — Vol. 2, iss. 1. — P. 865–872. doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.093.

19. Xin Zhao. A study on dynamic stress intensity factors of rail cracks at high speeds by a 3D explicit finite element model of rolling contact / Xin Zhao, Xiaogang Zhao, Chao Liu [et al.] // Wear. — 2016. — Vol. 366–367. — P. 60–70 /doi.org/10.1016/j.wear.2016.06.001.

20. Trollé, B. 2D fatigue crack propagation in rails taking into account actual plastic stresses / B. Trollé, M.-C. Baietto, A. Gravouila [et al.] // Engineering Fracture Mechanics. — 2014. — Vol. 123. — P. 163–181. doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.03.020.

21. Bogdański, S. Experimental and theoretical investigation of the phenomenon of filling the RCF crack with liquid / S. Bogdański, P. Lewicki // Wear. — 2005. — Vol. 258, iss. 7–8. — P. 1280–1287. doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.038.

22. Makino, T. The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel / T. Makino, T. Kato, K. Hirakawa // International Journal of Fatigue. — 2012. — Vol. 36, iss. 1. — P. 68–79. doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.08.014.

23. Dubourg, M. C. A predictive rolling contact fatigue crack growth model: onset of branching, direction, and growth — role of dry and lubricated conditions on crack patterns / M. C. Dubourg, V. Lamacq // Journal of Tribology — Transactions of the ASME. — 2002. — Vol. 124, iss. 4. — P. 680–688. DOI: 10.1115 / 1.1479698.

24. Benuzzi, D. Stress intensity factor range and propagation mode of surface cracks under rolling — sliding contact / D. Benuzzi, E. Bormetti, G. Donzella // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. — 2003. — Vol. 40, iss. 1. — P. 55–74. doi.org/10.1016/S0167-8442(03)00034-X.

25. Kalker, J. J. Some New Results in Rolling Contact / J. J. Kalker, J. Piotrowski // Vehicle System Dynamics. — 1989. — Vol. 18. — P. 223–242. doi.org/10.1080/00423118908968920.

26. Kato, T. Investigation of influence of white layer geometry on spalling property in railway wheel steel / T. Kato, A. Sugeta, E. Nakayama // Wear. — 2011. — Vol. 271, iss. 1. — P. 400–407. doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.024.

27. Seo, J. W. Numerical stress analysis and rolling contact fatigue of White Etching Layer on rail steel / J. W. Seo, S. Kwon, H. K. Jun, D. H. Lee // International Journal of Fatigue. — 2011. — Vol. 33, iss. 2. — P. 203–211. doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.08.007.

28. Lian, Q. Crack propagation behavior in white etching layer on rail steel surface / Q. Lian, G. Deng, A. A. Juboori [et al.] // Engineering Failure Analysis. — 2019. — Vol. 104. — P. 816—829. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.067.

29. Rice, J. R. A Path Independent Integral and Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks / J. R. Rice // Journal Applied Mechanics. —1968. — Vol. 35. — P. 379–386.

30. Rybicki, E. F. A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral / E. F. Rybicki, M. F. Kanninen // Engineering Fracture Mechanics. — 1977. — Vol. 9, iss. 4. — P. 931–938. doi.org/10.1016/0013-7944(77)90013-3.

31. Chow, W. T. Finite element calculation of stress intensity factors for interfacial crack using virtual crack closure integral / W. T. Chow, S. N. Atluri // Computational Mechanics. — 1995. — Vol. 16. — P. 417–425. https://doi.org/10.1007/BF00370563.

32. Данильченко, С. А. Моделирование упругого индентирования многослойного антифрикционного покрытия рельса методом конечных элементов / С. А. Данильченко, А. В. Наседкин // Известия Самарского научного центра РАН. — 2011. — Т. 13, № 3 (4). — С. 1029–1032.

33. Чебаков, М. И. Моделирование контактного взаимодействия тел с неоднородными по глубине механическими свойствами при наличии трения в зоне контакта / М. И. Чебаков, Е. М. Колосова, А. В. Наседкин // Известия Самарского научного центра РАН. — 2011. — Т. 13, № 4 (3). — С. 1252–1255.

34. Наседкин, А. В. Моделирование контактного взаимодействия железнодорожного колеса и рельса с тонким трехслойным покрытием / А. В. Наседкин, Д. Ю. Сухов, М. И. Чебаков // Вестник Ростовского университета путей сообщений — 2010. — № 2. — С. 11–16.

35. Al-Juboori, A. Squat formation and the occurrence of two distinct classes of white etching layer on the surface of rail steel / A. Al-Juboori, D. Wexlera, H. Lia [et al.] // International Journal of Fatigue. — 2017. — Vol. 104. — P. 52–60. doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.07.005.

36. Li, S. Brown etching layer: a possible new insight into the crack initiation of rolling contact fatigue in rail steels / S. Li, J. Wu, R. H. Petrov [et al.] // Engineering Failure Analysis. — 2016. — Vol. 66. — P. 8–18. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.03.019.

Сдана в редакцию 12.02.2020
Запланирована в номер 28.04.2020

Об авторах:

Перелыгина Александра Юрьевна, и. о. заведующего кафедрой «Инженерная и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), кандидат технических наук, ResearcherID AAF-1094-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7814-0431, perelygina@isru.edu

Конюхов Владимир Юрьевич, профессор кафедры «Автоматизация и управление», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), кандидат технических наук, профессор, ResearcherID AAE-5296-2020, ScopusID 56769690400, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9137-9404, c12@ex.istu.edu

Балановский Андрей Евгеньевич, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и материалы», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), кандидат технических наук, ResearcherID AAE-2964-2020, ScopusID 56375902200, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6466-6587, fuco.64@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. Ю. Перелыгина — анализ литературы, выбор цели исследования, постановка задач, планирование и организация совместной работы; создание модели растрескивания в белом слое в условиях подвижного контакта с использованием коммерческого программного обеспечения для моделирования методом конечных элементов *ANSYS* / *LS-DYNA*, написание статьи. В. Ю. Конюхов — анализ расчетных данных, параметрическая идентификация моделей на основе графических экспериментальных распределений с использованием статистических методов и электронных таблиц *Excel*. А. Е. Балановский — экспериментальные работы по материаловедению (вырезка, проба, подготовка, металлография, измерение твердости образцов рельсов с белым слоем), создание модели формирования белого слоя на головке рельса при помощи программы *SYSWELD*, написание статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.